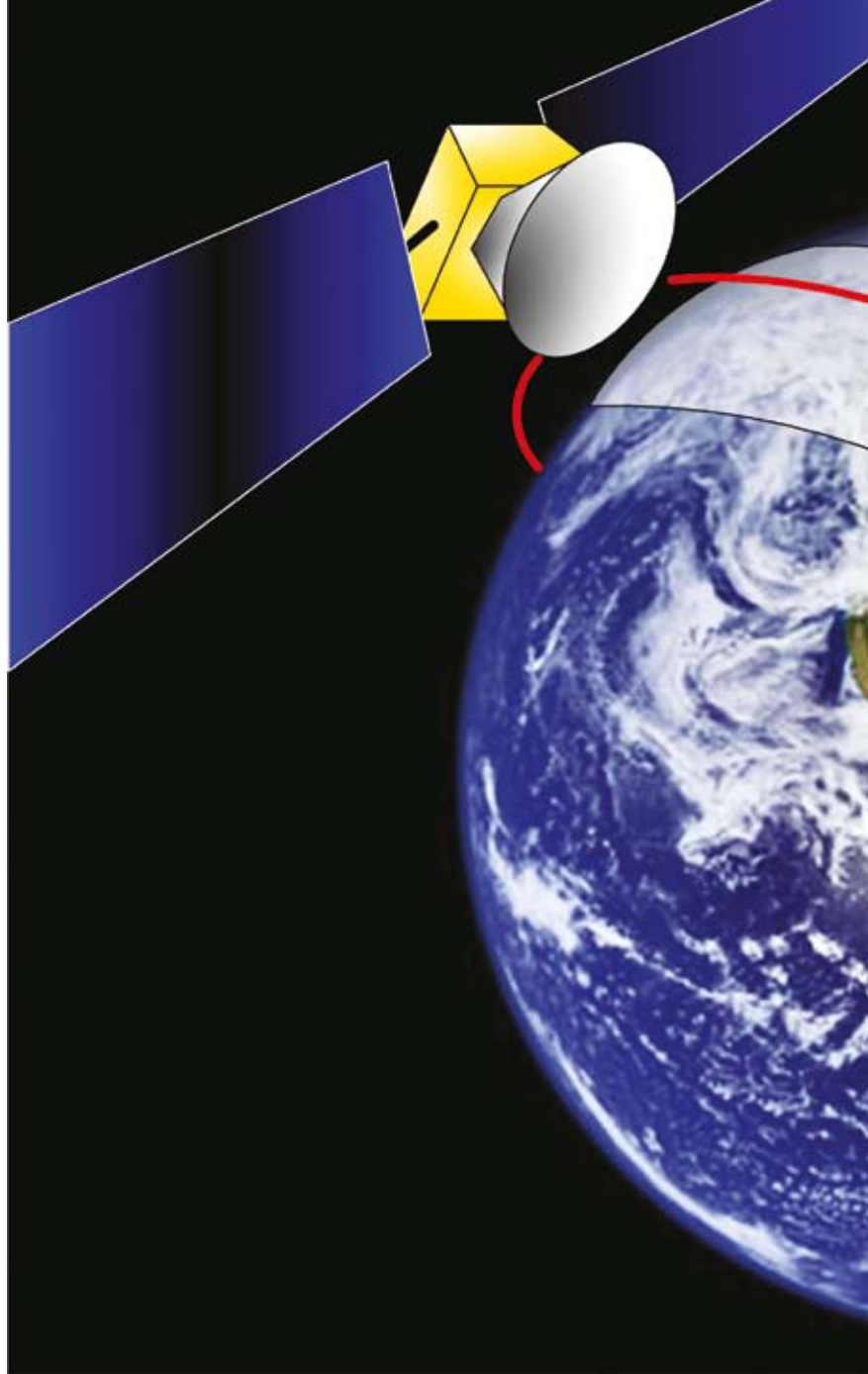


In welke toestand bevindt de aarde zich nu, hoe was het vroeger en hoe zal de aarde verder evolueren? Computersimulaties geven een eerste idee, maar zijn nooit een perfecte weergave van de natuur. Aardobservaties vormen een andere bron van informatie, maar deze zijn onderhevig aan meetfouten en niet continu in tijd en ruimte. Het beste en meest complete beeld van de aarde vormt men door simulaties en observaties te combineren. Dit proces noemt men 'data-assimilatie' in aardwetenschappen.

Gabriëlle De Lannoy - Valentijn Pauwels - Niko Verhoest



Het Beeld van de Aarde

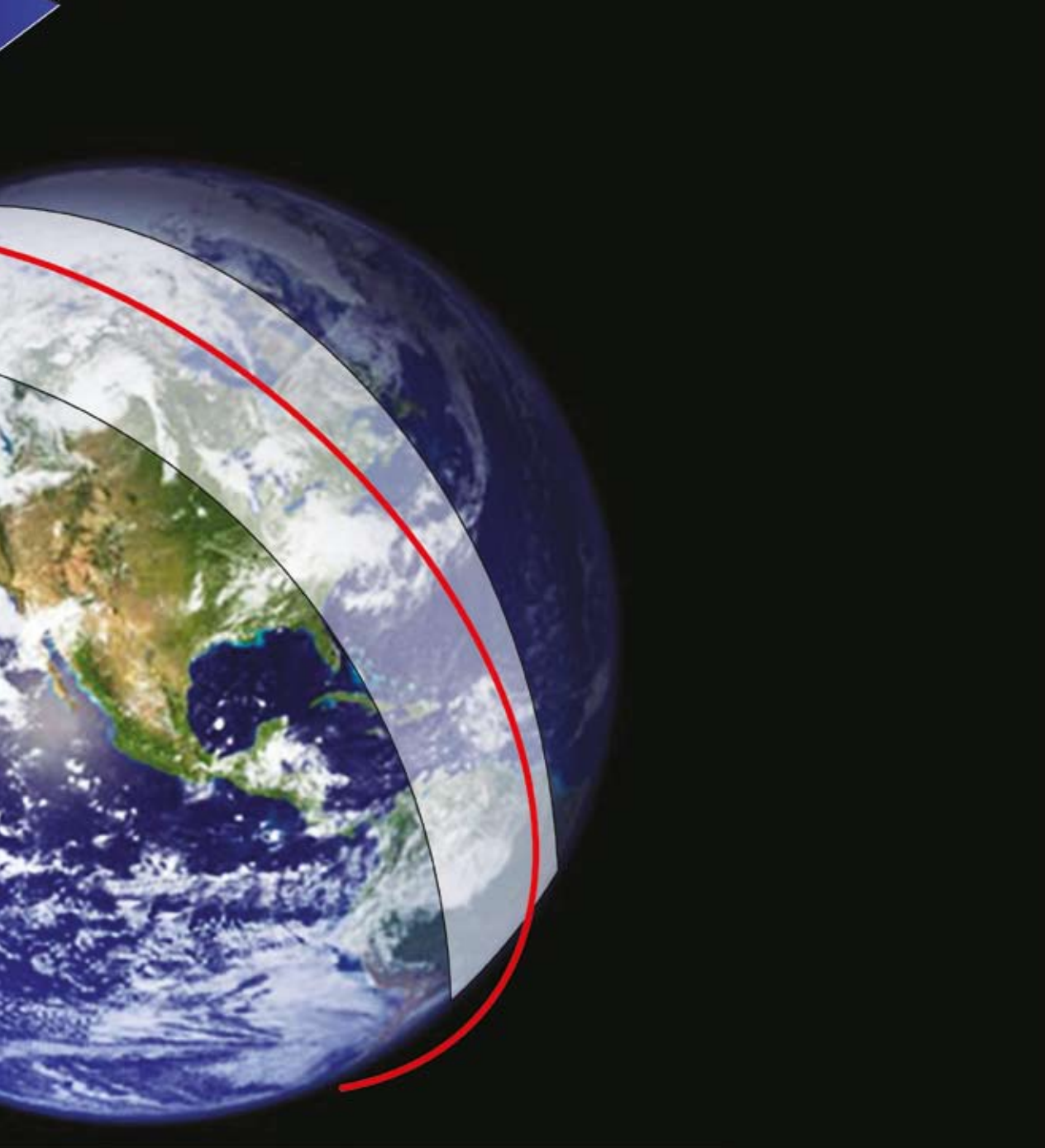
Vandaag voorspellen we het weer van morgen, overmorgen en volgende week. Morgen komen er satellietbeelden binnen en beseft men dat de voorspellingen een beetje bijgestuurd moeten worden. Overmorgen wordt men plots opgeschrikt door onverwacht rampweer.

Wat weten we eigenlijk wel en niet over onze aarde? Wat is de objectieve informatie achter de discussie omtrent 'global change'? Hoe zeker is de voorspelde klimaatsverandering? De wetenschap heeft een beter inzicht gecreëerd in natuurlijke aardprocessen, maar dat inzicht is nog verre van ideaal en de perfecte kennis zullen we wellicht nooit bereiken. Plato (4^{de} eeuw v. Chr.) schetste in zijn welbekende allegorie van de grot (*Politeia*) een filoso-

fisch beeld van mens en wereld en misschien leunt het werk van hedendaagse exacte onderzoekers in aardwetenschappen wel nauw aan bij zijn idee: de werkelijkheid kan men niet vatten, dus probeert men zich een beeld te vormen van de aarde, haar toestand en evolutie van processen. Het beste en meest complete beeld van de aarde vormt men door computersimulaties en observaties te combineren. Dit proces noemt men 'data-assimilatie' in aardwetenschappen (Figuur 1).

Weten en meten

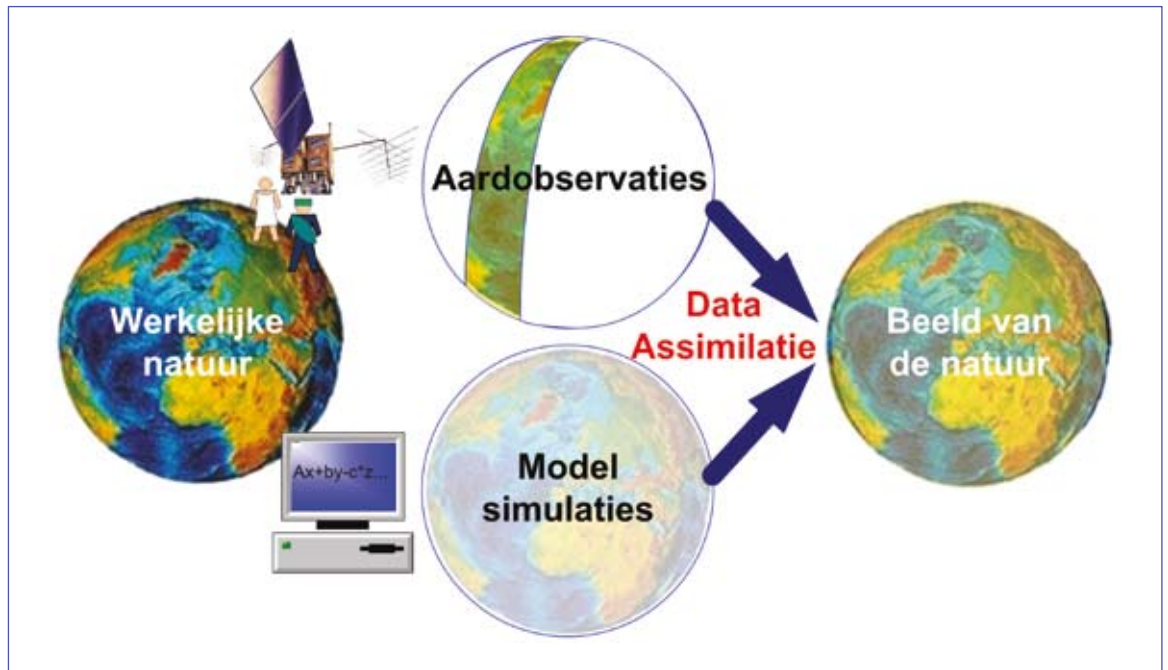
Voorspellingen van het weer, overstromingen, gewasopbrengst, ozongehalte, zeestromingen, enz... nemen een



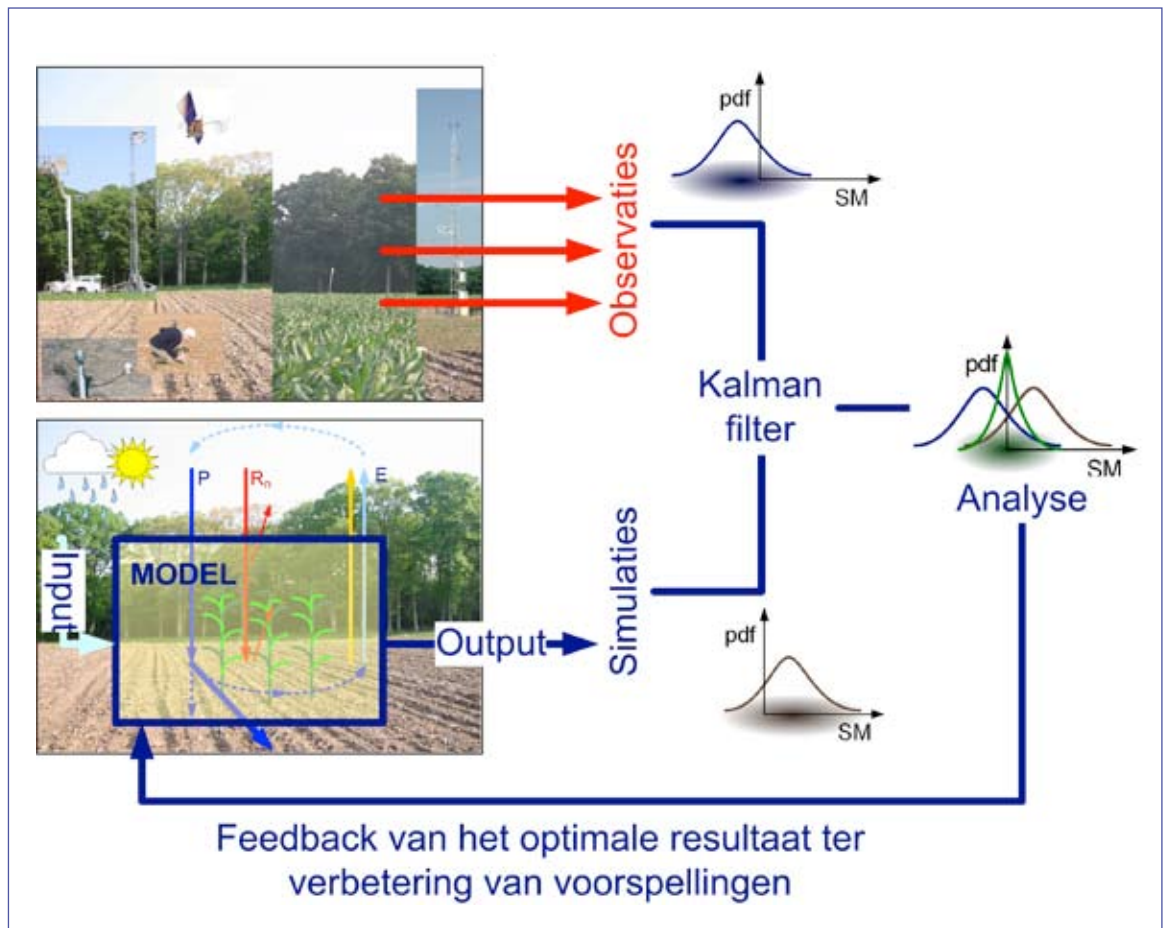
belangrijke plaats in ons dagelijks leven in en beïnvloeden heel wat beslissingen op politiek, economisch, sociaal en wetenschappelijk niveau. Dat de aarde verder zou opwarmen is een voorspelling, net zoals de voorspelling van het weer of de gewasgroei voor volgende weken. Modelsimulaties zijn oplossingen van differentiaalvergelijkingen die een wiskundige uitdrukking zijn van fysische wetten: informatie over de huidige toestand (of het verleden) en de heersende drijvende krachten is nodig om de toekomst te voorspellen op eender welke locatie en tijdstip. Het weer in en rond België van de voorbije week bepaalt grotendeels het weer van morgen, maar een niet voorzien flapperen van vlindervleugels kan -bij wijze van spreken- een onverwachte tornado veroorzaken (Lorenz, 1963).

Door middel van aardobservaties kan men ook vrij goed inschatten wat er zich afspeelt op het land, in de oceaan en in de atmosfeer van onze aarde. Per definitie is echter iedere meting een discrete observatie in de tijd en de volledige 3 dimensionale (volume) ruimte van het onderzochte systeem zal nooit bemonsterd worden. Iedere observatie gebeurt ook op een bepaalde schaal in de ruimte, met de daaraan gekoppelde nauwkeurigheid: een satellietbeeld kan dan wel een groot gebied in beeld brengen, maar de informatie in het beeld zal niet heel nauwkeurig zijn (een extreem voorbeeld: de Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satelliet zou indirect grondwaterhoeveelheden schatten over landoppervlakten van ongeveer 10^6 km^2 , maar die waarden vertellen bitter weinig over de hoeveelheid water in uw

Figuur 1: De mens kan werkelijke natuur niet volledig vatten: metingen en modellen voorzien ons van een afschijnsel van de werkelijkheid. Door een combinatie van onzekere modelsimulaties en beperkte, onzekere, aardobservaties kan een optimaal beeld van de aarde berekend worden.



Figuur 2: Assimilatie van bodemvochtwaarnemingen in een hydrologisch model. Pdf staat voor de probabiliteitsdichtheidsfunctie, die de onzekerheid op de variabelen begroot. SM staat voor de toestandsvariabele bodemvocht.



achtertuin, al is die een deel van de bemeeten landoppervlakte). Verder moet ieder meetinstrument gekalibreerd worden en zal het nooit perfect de werkelijkheid kunnen vatten.

Zowel modellen als metingen bevatten unieke informatie over de werkelijkheid. Door een optimale statistische combinatie van deze informatiebronnen kan men superieure producten bekomen, die vervolgens nuttig gebruikt

kunnen worden om verdere voorspellingen te verbeteren. Het assimileren van data in modellen wordt dagelijks gebruikt voor de weersvoorspellingen en is nu ook heel belangrijk geworden om allerlei variabelen op het land en in oceanen goed te schatten. Data-assimilatie met het oog op voorspellingen gebeurt meestal door een filteralgoritme dat een gewogen gemiddelde maakt van modelresultaten en observaties, op basis van de onzekerheid in beide informatiebronnen.

Natuurwetten simuleren: wat de mens denkt over de Aarde

De verschillende disciplines binnen de aardwetenschappen hebben elk gespecialiseerde modellen om hun specifieke systeem te simuleren. De stromingen in oceanen en zeeën (oceanografie) worden meestal met grootschalige modellen berekend op basis van uitgewerkte advection-diffusie vergelijkingen en daarbij wordt de evolutie van de fysische eigenschappen, zoals zoutgehalte en temperatuur, opgevolgd. Atmosferische circulaties en de daarbij horende temperatuur-, druk- en waterdampgradiënten worden gebruikt in de meteorologie, bijvoorbeeld voor weersvoorspellingen. In de hydrologie krijgt het lot van de waterdruppel in de watercyclus over land speciale aandacht, maar wordt ook de verdeling van energie onder de vorm van warmte nauw opgevolgd.

Laten we als voorbeeld bij een hydrologisch systeem stil staan (figuur 2). Een benadering van de hoeveelheid bodemvocht op aarde kan op ieder ogenblik en ieder punt op aarde berekend worden met een hydrologisch model, indien een begintoestand van bodemvocht en voorspellingen of metingen van neerslag en zonnestraling gekend zijn. Neerslag dringt door de vegetatie en infiltreert in de bodem. De Richards-vergelijkingen berekenen de verdeling van het bodemvocht over het profiel onder invloed van de zwaartekracht. Water wordt ook onttrokken en aan de atmosfeer terug gegeven door planten (transpiratie) en door verdamping. Overtollig water stroomt weg naar de rivieren door snelle oppervlakkige afvoer of na een verblijf in de diepere aardlagen. De mens heeft de kennis van deze fysische processen in numerieke vergelijkingen gegoten: het computermodel van de hydrologische cyclus is een simpele, maar onzekere, benadering van de werkelijkheid.

Observaties: Aarde, kunt u even diep ademen?

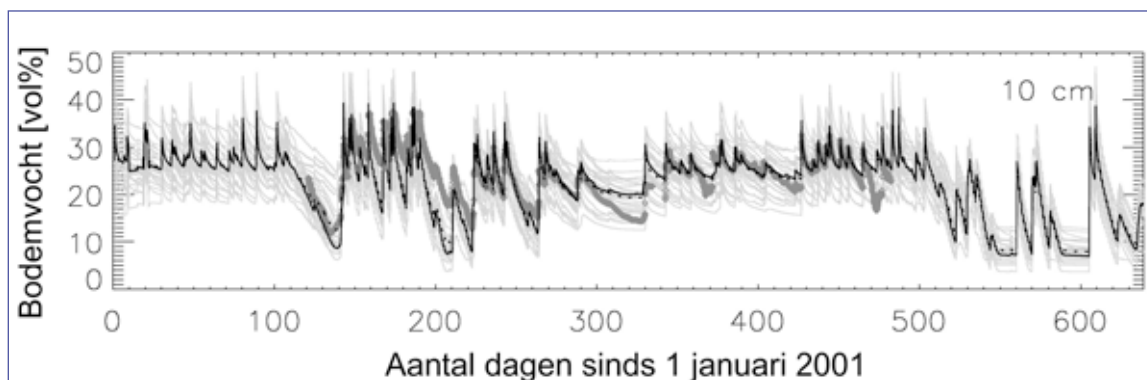
Een enorme variëteit aan sensoren meet fysische en chemische variabelen op aarde op verschillende ruimtelijke en temporele schalen. Satellieten zorgen dagelijks voor nieuwe informatie over o.a. de wolkenvelden, het ozongehalte, het bodemvocht, de vegetatie, de sneeuwbedekking of de oceaantemperatuur op wereldschaal. Op regionale schaal laten weerradars toe iedere neerslagbui vrij nauwkeurig op te volgen, afstandswaarnemingen vanuit vliegtuigen kunnen de gewasgroei of het bodem-

vocht binnen een beperkt gebied opmeten, radiosondes bemonsteren weerkundige aspecten in de atmosfeer over een lijntraject, en de windhaan op de kerktoren bepaalt de windrichting op 1 punt in de atmosfeer.

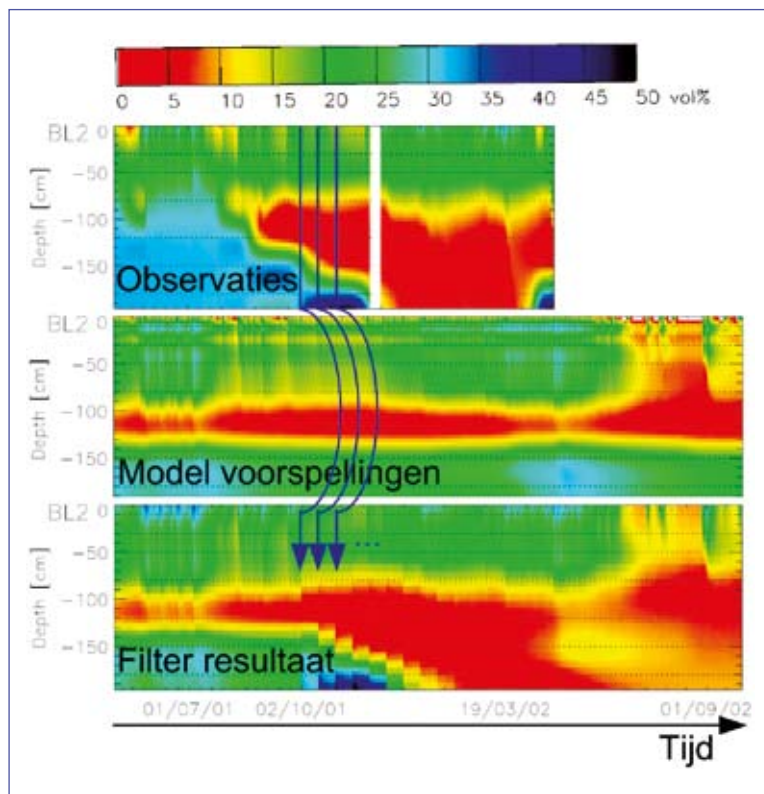
Beperken we ons weer tot het voorbeeld van terrestrische processen, dan kunnen actieve en passieve microgolfsensors wel in de meest populaire categorie gerangschikt worden om bodemvocht, -temperatuur en sneeuwhoeveelheden over land te kwantificeren. Deze satellitsensoren meten echter enkel toestandsvariabelen in het buitenste laagje van de aarde: ze kunnen de aarde niet 'doorlichten'. Aan het andere uiterste op de ruimtelijke schaal staan de puntgegevens. Veel studenten over heel de wereld hebben zich ooit moeten inspannen om op specifieke locaties bodemonsters te nemen. Het bodemvocht kan zo op enkele puntlocaties in een veld nauwkeurig gemeten worden op verschillende dieptes. Helaas kan de satelliet noch de student overal tegelijk zijn en zijn ze beide niet perfect...

De diagnose: het beeld

Vooraleer algemene systeemmodellen kunnen gebruikt worden voor voorspellingen, moeten ze afgeijkt worden voor het gekozen studiegebied en de gekozen tijdsperiode. Door te spelen met modelparameters worden de modelresultaten zo goed mogelijk afgesteld op 'verleden' waarnemingen. Parameterschatting is een eerste vorm van data-assimilatie: het optimaliseert de eerste beelden die het model op eigen houtje zal produceren. Deze voorspelde beelden zijn veelal flauwe afschijnsels van de werkelijkheid: hoe verder voorspeld in de toekomst, hoe onzekerder het beeld. Wanneer vervolgens observaties beschikbaar komen, kunnen deze gemengd worden met het voorspelde onzekere beeld om een nieuw, beter, idee van de huidige aardtoestand te kennen als uitgangspunt voor verdere voorspellingen. Iets specifieker: de initiële voorwaarden worden door filteren bijgesteld, rekening houdend met de onzekerheid op zowel de voorspellingen als de observaties (Figuur 2). Indien er een systematisch verschil is tussen de modelvoorspellingen en de observaties, kan via data-assimilatie ook een correctie voor dat verschil gezocht worden om het uiteindelijke resultaat vrij van systematische fouten te maken (De Lannoy et al., 2007).



Figuur 3: Ensemble van modelvoorspellingen (lichtgrijze 'spaghetti-plot') voor bodemvocht op 10 cm diepte op 1 locatie in een landbouwveld, met aanduiding van het ensemble gemiddelde (volle zwarte lijn), de gekalibreerde deterministische modelsimulatie (streeplijn, dikwijls achter de lijn van het ensemble gemiddelde) en observaties in grijze symboltjes.



Een hydrologisch model voorspelt het bodemvocht, de bodemtemperatuur, de sneeuw eigenschappen in verschillende bodem- en sneeuwlagen en de daarvan afhankelijke fluxen, zoals evapotranspiratie en waterafvoer. De onzekerheden in die voorspellingen worden typisch nagebootst door een verzameling modeltrajectories (ensemble, figuur 3) te genereren met kleine wijzigingen in parameterwaarden, initiële condities of invoergegevens. Wanneer de Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System (AMSR-E) satelliet passeert, worden microgolfsignalen van de aarde verzameld in de vorm van 'brightness temperature'. De kwaliteit van de sensor bepaalt de nauwkeurigheid van de verzamelde signalen. Deze informatie wordt omgezet naar schattingen van bodemvocht of sneeuwhoeveelheid over pixels van honderdtallen vierkante meter. De interpretatie van de onverwerkte microgolfsignalen introduceert bijkomende onzekerheid op de afgeleide bodemvochtwaarden.

Een bodemvochtbeeld kan gebruikt worden om op continentale schaal het bovenste laagje bodemvocht beter te schatten, maar het filteralgoritme laat ook toe de voorspellingen van (niet-geobserveerd) bodemvocht en bodemtemperatuur in diepere bodemlagen te verbeteren. Figuur 4 toont hoe assimilatie van gemeten bodemvochtprofielen op 1 punt in een veld de tijdsevolutie van het gesimuleerde bodemvocht kan corrigeren. Indien de fysische wetten in het model juist gevat worden, zal een verbetering van de toestandsvariabelen ook de resulterende evapotranspiratie- en afvoerfluxen verbeteren.

Figuur 4: Enkele observaties (geselecteerd uit de data in de bovenste figuur) worden gecombineerd met modelsimulaties (middelste figuur) om een optimaal bodemvochtprofiel in de tijd te schatten met een ensemble Kalman filter voor toestand- en systematische foutschatting (onderste figuur). De niet-geassimileerde data laten in dit voorbeeld toe de filterresultaten te valideren.

De verschillende takken in de aardwetenschappen doen momenteel enorme inspanningen om hun geselecteerde observaties en modellen te integreren via data-assimilatie. We mogen hopen dat in de toekomst de verschillende data-assimilatie systemen in verschillende disciplines met elkaar gekoppeld worden. Zo kan een verbetering van de hydrologische toestandsvariabelen een positieve impact hebben op de atmosferische voorspellingen, die op hun beurt de oceanische stromingen beter kunnen controleren, enz. Met een verbeterde kennis van zaken kan men het beheer van natuurlijke bronnen, producten en processen optimaliseren. Verbeterd waterbeheer alleen al kan voorkomen dat jaarlijks wereldwijd meer dan 150 miljoen mensen getroffen worden door overstromingen of droogte... Het kan ook best zijn dat men in de klimatologie over enkele jaren nieuwe data assimileert en na assimilatie een andere klimaatsverandering dan nu verwacht begint te voorspellen.

Data assimilatie voor toestandreconstructie

Data assimilatie om de optimale systeemtoestand te schatten kent al een lange geschiedenis. Gauss probeerde in 1795 (Sorenson, 1970) de baan van planeten te schatten door het verschil tussen observaties en voorspellingen deterministisch te minimaliseren. Een probabilistische benadering kwam er door een lineaire Bayesiaanse combinatie van 'random' (onzekere) voorspellingen en observaties te maken met de Kalman filter (Kalman, 1960). In de aardwetenschappen heeft men lange tijd vereenvoudigde filteralgoritmes gebruikt, omdat de rekenkundige kracht te beperkt was om volledig rekening te houden met variërende onzekerheden in de tijd op modelschattingen. Enkele vroege filteralgoritmes zijn optimale en statistische 'interpolatie', nudging, statistical correction, successive correction en direct insertion. Tegenwoordig laat de technologie toe om zonder problemen 3-dimensionale Kalman filters toe te passen (Reichle, 2008).

Besluit

Het land, de atmosfeer en de oceaan maken verschillende subsystemen van onze aarde uit en worden meestal afzonderlijk bestudeerd. De verschillende taken in de aardwetenschappen gebruiken echter allemaal zeer gelijkaardige technieken in hun onderzoek: er wordt gemodelleerd en waarnemingen worden geanalyseerd. Modellen noch metingen zijn echter perfecte weergaves van de werkelijkheid. De optimale schatting van de aardtoestand kan men vinden als een combinatie van modelresultaten en waarnemingen. Dit data-assimilatieproces wint enorm aan interesse nu computers nog weinig rekenkundige beperkingen opleggen en allerhande metingen een steeds beter idee van de aardtoestand geven. Data-assimilatie integreert al onze menselijke kennis over de aarde in een consistent beeld van de werkelijkheid - een werkelijkheid die we hoogstwaarschijnlijk nooit perfect zullen vatten.

De auteurs

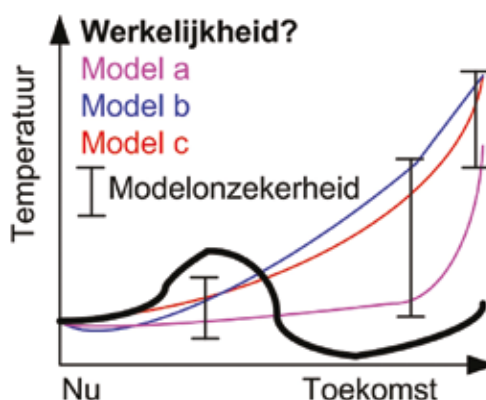
Gabriëlle DE LANNOY is postdoctoraal onderzoeker van het Fonds Wetenschappelijk Onderzoek (FWO). Ze behaalde haar doctoraat in de Toegepaste Biologische Wetenschappen (2006) en het diploma Bio-ingenieur in het Bodem- en Waterbeheer (2001) aan de Universiteit Gent. Voor haar bio-ingenieursthesis ontving ze de 1^{ste} KVIV ingenieursprijs en voor haar doctoraatswerk de World Meteorological Organization Research Award for Young Scientists. Momenteel doet ze vooral data-assimilatie onderzoek in het Center for Research on Environment and Water (CREW) van het Institute of Global Environment and Society (IGES), Maryland, Verenigde Staten en aan het Laboratorium voor Hydrologie en Waterbeheer (LHWM), Universiteit Gent, België.
E-Mail: Gabrielle.DeLannoy@UGent.be

Valentijn PAUWELS is sinds 2005 docent hydrologie aan het Laboratorium voor Hydrologie en Waterbeheer van de Universiteit Gent. Hij behaalde het diploma van bio-ingenieur in de landbouwkunde aan de Universiteit Gent in 1994 en een doctoraat in Civil Engineering and Operations Research aan de Princeton University, Verenigde Staten, in 1999. Tussen 1999 en 2005 was hij postdoctoraal onderzoeker van het Fonds Wetenschappelijk Onderzoek (FWO). Zijn onderzoek legt zich toe op hydrologische modelontwikkeling en het optimaliseren van de werking van deze modellen.
E-mail: Valentijn.Pauwels@UGent.be

Niko VERHOEST is sinds 2002 docent Hydrologie en Waterbeheer aan het Laboratorium voor Hydrologie en Waterbeheer van de Universiteit Gent. Hij behaalde aan de Universiteit Gent in 1994 het diploma van Bio-ingenieur in de Landbouwkunde en in 2000 een doctoraat in de Toegepaste Biologische Wetenschappen: Land- en Bosbeheer. Hij specialiseert zich voornamelijk in het waarnemen van hydrologische variabelen via teledetectie, het toepassen van nieuwe wiskundige technieken in de hydrologie en de ecohydrologie.
E-mail: Niko.Verhoest@UGent.be

Controversiële klimaatsverandering

De voorspellingen van klimaatsveranderingen zijn gesimuleerde onzekere resultaten, net zoals het weer van volgende week onzekere schattingen zijn. Een heikel punt is dat de modellen achter de weersvoorspellingen nog beter gecontroleerd zijn dan die voor klimaatsvoorspellingen. Als de weersvoorspellingen het nu en dan laten afweten, wat moeten we dan maken van de klimaatsvoorspellingen? We moeten begrijpen dat de gevoeligheid van ons werkelijke klimaatsysteem echt niet gekend is: wie heeft ooit het temperatuurseffect op een planeet zoals de aarde gemeten bij een verdubbeling van het CO₂ gehalte in de lucht? Modellen worden gebouwd op basis van 'historische' waarnemingen en aangezien men de werkelijke klimaatsgevoeligheid onder nieuwe omstandigheden niet kent, is men momenteel in die modellen beperkt tot een soort gissen en missen van de werkelijke fysische processen. Misschien zijn de resultaten van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) toevallig wel juist, misschien zijn ze grof overschat of... misschien staat ons een veel grotere verrassing te wachten dan voorzien! Men kent enkel de onzekerheid in de voorspellingen, bepaald over het bereik van verschillende geteste klimaatmodellen. De absolute fout ten opzichte van de ongekende werkelijkheid is echter totaal ongekend (Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, COLA brainstorming: Session: Uncertainty in Climate Change, L. Bengtsson, E. Schneider, J. Shukla, 10 juli 2008). Momenteel kijkt men uit naar data-assimilatie technieken om de klimaatmodellen te verbeteren en toekomstige voorspellingen minder onzeker te maken.



Referenties

- [1] De Lannoy, G.J.M., Reichle, R.H., Houser, P.R., Pauwels, V.R.N., Verhoest, N.E.C. (2007). Correcting for forecast bias in soil moisture assimilation with the ensemble Kalman filter. *Water Resources Research*, 43, W09410, doi:10.1029/2006WR00544.
- [2] Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems, *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.
- [3] Lorenz, E. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.
- [4] Reichle, R. H.: Data Assimilation Methods in the Earth Sciences, *Advances in Water Resources*, in press, Jan. 2008.
- [5] Sorenson, H. (1970). Least-squares estimation: From Gauss to Kalman. *IEEE Spectrum*, 63-68.